Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 1, Mar- Apr 2023, p. 1-15

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۲ ص. ۱۵-۱

Homepage: http://ifstrj.um.ac.ir
Research Paper

Study of the Functional Properties and the Retrogradation Behavior of Native Wheat Starch in the Presence of Cress Seed Gum and Sucrose

Sh. Taziki Shams-abadi[1], S.M.A. Razavi[2*]

Received: 2021.04.07
Revised: 2021.05.22
Accepted: 2021.05.31
Available Online: 2021.05.31

How to cite this article:
Taziki Shams-abadi, Sh., & Razavi, S.M.A. (2023). Study of the functional properties and the retrogradation behavior of native wheat starch in the presence of cress seed gum and sucrose. *Iranian Food Science and Technology Research Journal 19*(1): 1-15. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/IFSTRJ.2021.69660.1029

Introduction

Wheat starch granules are composed of amylose and amylopectin, which are responsible for the functions of starch such as swelling, gelatinization, pasting, gel formation, and retrogradation. The retrogradation changes the functional properties, it is an undesirable phenomenon in some starch-based foods which reduces the acceptability of food, and shortens the shelf life. Delaying or preventing of starch retrogradation is a major challenge in the food industry. Various ingredients such as carbohydrates imply an important role in improving the functional properties, decreasing amylose leaching and retarding the retrogradation of starch gels. Cress seed gum (CSG), as an emerging galactomannan, has shown the ability to improve the textural and rheological features of food systems based on its unique properties. Addition of CSG to the composite wheat-rice bread increased dough stability and improved the staleness of bread compared to guar gum. Also, the addition of CSG and xanthan gum to gluten-free bread stabilized the texture of bread during storage. Sucrose (SUC) is a common additive in food formulations which is useful as a sweetening agent and textural modification. Sugars have been able to reduce amylose leaching and accelerate or delay starch gel formation. They also delay retrogradation of starch gels during storage. Therefore, the objectives of this study were to determine the impact of different substitution levels of CSG (0, 5, 10 and 15%), SUC (0, 5 and 10%), and their blend on the functional properties (swelling strength and solubility), microstructure features, retrogradation kinetics and synthesis of native wheat starch (NWS) gel (4% w/w).

Materials and Methods

Cress seeds were purchased from a local medicinal market. NWS and SUC were supplied from Sigma Aldrich (Spain) and Merck (Germany) respectively. Starch suspensions (0.6 gr powder/20 ml water) substituted with CSG (0, 5, 10, and 15% w/w) and SUC (0, 5, and 10% w/w) were prepared to estimate the swelling power and solubility index. To produce starch gel, the 4% w/w suspensions of NWS-CSG-SUC were prepared by dissolving the appropriate amount of CSG powder and SUC in deionized water. Then, each suspension was poured into a stainless-steel cylindrical container and was heated to 95 ºC and held at 95 ºC for 3 min and then cooled to 50 ºC while stirring continuously at 160 rpm with a mechanical mixer. Finally, the pastes were kept at ambient temperature (25 ºC) for 1 h. To assess gel structure, imaging of the gels was performed by scanning electron microscopy (SEM). The retrogradation kinetics and syneresis of gel samples were determined after storage at 4 ºC for 0, 1, 7 and 14 days.

Results and Discussions

The swelling power and solubility index of NWS increased with increasing the replacement level of CSG. CSG promotes adhesive interactions among the gelatinized granules. This can enhance the forces applied to them, facilitating water entering (increasing swelling), amylose solubilization and its exudation. In contrast, SUC compete with starch molecules for water in the system and thus preventing gelatinization and mobility of starch molecules reduced the

1 and 2- M.Sc Graduated Student and Professor, Center of Excellence in Native Natural Hydrocolloids of Iran, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: s.razavi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.69660.1029

swelling power. The starch-gum-sugar mixtures had a higher swelling power compared to the starch and starch-sugar samples. The mixed samples had higher solubility values than each of them individually. SEM images showed that the pore size of starch gel decreased and increased from 33.01 to 29.44 µm and to 45.37 µm with increasing the substitution levels of CSG and SUC, respectively. NWS-15% CSG-5% SUC gel had 31.34 µm pore size. After storage for 14 days at 4 ºC, the CSG substitution with NWS reduced the rate of retrogradation and syneresis from 0.101 to 0.52 (s^{-1}) and from 50% to 23%, respectively. It could be related to creating a film around the granules by the leaked amylose and the CSG in the continuous phase, so inhibiting further swelling and polymers leaking out and related to high water holding capacity of CSG. The addition of SUC reduced the rate of the process to 0.096 (s^{-1}) but because of its low water holding capacity, the value of syneresis enhanced to 57%. In the mixed gels, more reduction of the retrogradation rate and syneresis was observed which was clearly at high CSG replacement. The retrogradation rate of the NWS-15%CSG-5%SUC was 0.057 (s^{-1}) and its syneresis was 45%. According to the results, it can be concluded that 15% CSG and 5% SUC replacement levels can effectively improve the functional properties and reduce the rate of retrogradation and syneresis of NWS during storage.

Keywords: Gel structure, Hydrocolloids, Starch, Sugar, Syneresis

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 19, No. 1, Mar- Apr 2023, p. 1-15

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۲ ص. ۱۵-۱

مقاله پژوهشی

مطالعه خصوصیات عملکردی و رفتار بیاتی نشاسته طبیعی گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز

شکوفه تازیکی شمس‌آبادی[۱]- سید محمدعلی رضوی[۲]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

چکیده

در این پژوهش، اثر سطوح جایگزینی صمغ دانه شاهی (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵٪) و ساکارز (۰، ۵ و ۱۰٪) بر خصوصیات عملکردی (قدرت تورم و حلالیت) سوسپانسیون نشاسته و همچنین ساختمان، کنتیک بیاتی و آب‌اندازی ژل نشاسته گندم پس از نگهداری به مدت صفر، ۱، ۷ و ۱۴ روز در دمای $4\ ^oC$ مورد مطالعه قرار گرفتند. قدرت تورم نشاسته گندم با افزایش غلظت جایگزینی صمغ و قند به ترتیب افزایش و کاهش یافت. نمونه‌های مخلوط سه جزئی نشاسته–صمغ–قند دارای قدرت تورم بالاتری در مقایسه با نمونه نشاسته و مخلوط نشاسته–قند داشتند. میزان حلالیت نشاسته با افزایش غلظت صمغ و قند افزایش یافت و نمونه‌های مخلوط دارای مقادیر حلالیت بالاتری نسبت به هر یک به صورت مجزا بودند. تصاویر میکروسکوپی نشان دادند که حضور صمغ منجر به ایجاد ساختمان متراکم‌تر با اندازه حفرات کوچک‌تر ژل نشاسته شد، درحالی که حضور قند ساختمانی گسسته‌تر با اندازه حفرات بزرگ‌تری را ایجاد کرد. پس از نگهداری نمونه‌های ژل به مدت ۱۴ روز در دمای $4\ ^oC$ مشاهده شد که افزودن صمغ تأثیر بسزایی در کاهش سرعت بیات شدن و میزان آب‌اندازی نشاسته به ترتیب از (s^{-1}) ۰/۱۰۱ به ۰/۵۲ و از ۵۰٪ به ۲۳٪ داشت. قند نیز منجر به کاهش سرعت بیات شدن ژل نشاسته تا (s^{-1}) ۰/۰۹۶ شد، اما میزان آب‌اندازی آن را تا ۵۷٪ افزایش داد. نمونه‌های ژل مخلوط به خصوص در غلظت ۱۵٪ جایگزینی صمغ دارای سرعت بیات‌شدن (s^{-1}) ۰/۰۵۷ و میزان آب‌اندازی ۴۵٪ بودند.

واژه‌های کلیدی: آب‌اندازی، ساختار ژل، قند، نشاسته، هیدروکلوئید

مقدمه

نشاسته در صنعت غذا از منابع مختلفی شامل ذرت، برنج، گندم، سیب‌زمینی، کاساوا، موز و سورگوم بدست می آید (Murphy, 2000). از بین منابع تولید نشاسته، گندم به مقدار زیاد در کشور ایران کشت می‌شود. میزان تولید گندم در کشور در سال ۲۰۱۹ به ۱۶ میلیون و ۸۰۰ تن رسیده است (FAO, 2020) و میزان نشاسته تولیدی در ایران به طور متوسط ۴۵۰ هزار تن در سال می‌باشد. گرانول‌های نشاسته گندم از دو پلیمر آمیلوز و آمیلوپکتین تشکیل شده‌اند که مسئول عملکردها و رفتارهای نشاسته هستند. دیسپرسیون نشاسته در طی فرآیند گرم کردن– سرد کردن رفتارهای جذب آب، تورم، ژلاتینه شدن، خمیری شدن، تشکیل ژل و بیات شدن را از خود نشان می‌دهد. رخداد پدیده بیاتی از خصوصیات عملکردی نشاسته از جمله قدرت تورم و حلالیت و در نتیجه نشت مولکول‌های آمیلوز به فاز پیوسته نشأت می‌گیرد (Shevkani *et al*., 2017). نشاسته گندم به‌عنوان ماده اولیه در دسترس و ارزان قیمت (Dengate, 1984) در حوزه صنایع غذایی به‌عنوان قوام دهنده در سوپ‌ها، پُر کننده، بافت دهنده و نگهدارنده رطوبت در کیک‌ها و فرآورده‌های گوشتی، تشکیل ژل در ژله‌ها، پایدار کننده و جایگزین چربی در غذاهای بر پایه نشاسته به کار می‌رود (Mason, 2009; Maningat *et al*., 2009). اما پدیده بیاتی نشاسته یک مسئله مهم در محصولات فرآوری شده بر

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استاد، قطب علمی هیدروکلوئیدهای طبیعی بومی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.razavi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.69660.1029

پایه نشاسته می‌باشد. این پدیده نامطلوب، طی مدت‌زمان نگهداری آب‌اندازی را به دنبال دارد، از قابلیت پذیرش محصولات غذایی می‌کاهد و زمان نگهداری آنها را کوتاه می‌کند (Shevkani et al., 2017). تأخیر یا جلوگیری از بیات شدن نشاسته در صنعت مواد غذایی یک چالش بزرگ می‌باشد و برای تولید کنندگان حائز اهمیت است. حضور افزودنی‌های مختلف از جمله کربوهیدرات‌ها نقش مهمی در تأخیر سرعت بیات شدن نشاسته‌ها داشته اند، اگرچه در برخی پژوهش‌ها مشخص شده است که قندهای ساکارز و گلوکز باعث افزایش سرعت بیات شدن نشاسته شده‌اند (Biliaderis, 2009; Wang et al., 2015). بسیاری از مطالعات نشان دادند که هیدروکلوئیدها (صمغ گوار، صمغ زانتان، صمغ لوبیای اقاقیا، کربوکسی متیل سلولز، صمغ عربی، کنجاک گلوکومانان و غیره) با برهمکنش با اجزای اصلی گرانول‌های نشاسته (آمیلوز و آمیلوپکتین) اثرات مثبتی بر خصوصیات نشاسته داشتند و تا حدودی خصوصیات عملکردی و رفتار آن از جمله قدرت تورم، حلالیت، آب‌اندازی، دماهای شروع، حداکثر و نهایی ژلاتینه شدن، تشکیل ژل، بیات شدن و خصوصیات رئولوژیکی و ویژگی‌های بافتی را بهبود بخشیدند (Bahnassey and Breene, 1994; Biliaderis et al., 1997; Christianson et al., 1981; Lo and Ramsden, 2000; Lee et al., 2002; Tester and Sommerville, 2003; Funami et al., 2005, 2008; Zhou et al., 2008; Zhang et al., 2015; Xiong et al., 2017; Matia-Merino et al., 2019; Mirnezhad et al., 2021).

صمغ دانه شاهی به‌عنوان یک منبع هیدروکلوئیدی بومی از دسته گالاکتومانان‌ها هست. این هیدروکلوئید دارای خواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی منحصربه‌فرد است. صمغ دانه شاهی دارای وزن مولکولی ۵۴۰ کیلودالتون و ویسکوزیته ذاتی ۳/۹۱۶ دسی‌لیتر بر گرم و کنفورماسیون زنجیره نیمه سخت است که باعث تشکیل تجمعات و درگیری‌های ماکرومولکولی می‌شود (Karazhiyan et al., 2011b; Behrouzian et al., 2014). بعلاوه خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه شاهی در محیط غلیظ نشان دهنده پتانسیل بالای این صمغ به‌عنوان قوام دهنده و پایدار کننده (امولسیون‌ها و کف‌ها) است. صمغ دانه شاهی نه تنها تحت فرآیندهای حرارتی شدید (فرآیندهای پاستوریزاسیون، استریلیزاسیون، سرد کردن (دمای یخچال) و انجماد) ویژگی‌های رفتار جریان و عملکردی خود (مانند خصوصیات رئولوژیکی، بافتی، امولسیون کنندگی و تشکیل کف) را حفظ می‌کند بلکه خصوصیات عملکردی آن بعد از شرایط حرارتی تقویت می‌شود (Naji et al., 2013; Naji and Razavi, Naji et al., 2012; 2014). افزودن صمغ دانه شاهی در نان مخلوط گندم و برنج با افزایش جذب آب، باعث افزایش مقاومت خمیر و بهبود بیشتر بیاتی نان نسبت به صمغ گوار شد (Sahraiyan et al., 2013). همچنین افزودن صمغ دانه شاهی و زانتان به نان بدون گلوتن در طی زمان نگهداری با حفظ آب، باعث پایداری بافت مغز نان گردید (Naji-Tabasi and Mohebbi, 2015). نتایج انتشار یافته نشان داده است گالاکتومانان‌ها از طریق زنجیره‌های جانبی گالاکتوز در پیکره خود با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با دیگر پلی‌ساکاریدها از جمله نشاسته برهمکنش می‌کنند (Brennan et al., Funami et al., 2005; 2006; Kontogiorgos, 2015) و در نتیجه باعث کاهش مقدار آمیلوز نشت یافته و تأخیر در رتروگراداسیون نشاسته شدند (Funami et al., 2005).

ساکارز به‌عنوان یک افزودنی رایج در سیستم‌های غذایی و جزئی از فرمولاسیون فرآورده‌های غذایی است که حضور آن بر رفتار و خصوصیات عملکردی نشاسته تأثیرگذار است. قند به علت رقابت با پلیمر نشاسته بر سر آب موجود در سیستم و با کاهش ثابت دی‌الکتریک آب، ویژگی‌های حلال را تغییر می‌دهد و باعث کاهش برهمکنش مولکول‌های حلال با مولکول‌های پلیمر می‌شود. قندها با گرانول‌های نشاسته به رقابت می‌پردازند و آب در دسترس برای ژلاتینه شدن نشاسته را محدود می‌کنند؛ همچنین به علت برهمکنش‌های نشاسته و قند، اثر نرم کنندگی[1] کمتر قند نسبت به آب و پایدار کردن ناحیه آمورف توسط برقراری اتصالات عرضی با زنجیره‌های نشاسته، ژلاتینه شدن نشاسته گندم را به تأخیر می‌اندازند (Gunaratne et al., 2007). براساس نتایج انتشار یافته، قندها باعث افزایش یا کاهش ویسکوزیته برگشت[2] (تمایل به بیات شدن) نیز می‌شوند (Xing et al. 2017; Gunaratne et al., 2007). با توجه به مکانیسم قندها، آن‌ها از نشت بیشتر مولکول‌های آمیلوز به فاز پیوسته جلوگیری می‌کنند (Gunaratne et al., 2007). از طرفی سرعت کریستالیزاسیون مجدد آمیلوپکتین در ژل‌ها را طی نگهداری کاهش می‌دهند (Berski et al., 2018; Zhang et al., 2017).

از آنجایی که تاکنون اثر صمغ دانه شاهی برخصوصیات مخلوط نشاسته گندم- ساکارز بررسی نشده است، بنابراین اهداف کلی مطالعه حاضر ارزیابی تأثیر سطوح مختلف جایگزینی صمغ دانه شاهی (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵٪) و ساکارز (۰، ۵ و ۱۰٪) و مخلوط آن‌ها بر خصوصیات عملکردی (قدرت تورم و حلالیت) سوسپانسیون نشاسته و ساختمان، رفتار بیات شدن و آب‌اندازی ژل نشاسته گندم در طی زمان نگهداری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دانه‌های شاهی از بازار عطاری مشهد تهیه گردید. صمغ دانه شاهی تحت شرایط بهینه استخراج به روش کاراژیان تهیه شد

1- Plastisizing
2- Setback viscosity

(Karazhiyan *et al.*, 2018). نشاسته معمولی گندم (شماره کاتالوگ: S5127) از شرکت سیگما آلدریچ (آمریکا) خریداری گردید. ماده شیمیایی سدیم آزید و ساکارز با گرید آزمایشگاهی از شرکت مِرک (آلمان) خریداری شدند. در تمامی آزمون‌ها از آب دیونیزه استفاده شد.

تهیه سوسپانسیون و ژل مخلوط نشاسته گندم-صمغ دانه شاهی- ساکارز

سوسپانسیون ۴٪ نشاسته گندم و سوسپانسیون‌های مخلوط نشاسته-صمغ-قند با جایگزین کردن صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از صمغ دانه شاهی و صفر، ۵ و ۱۰٪ از ساکارز با پودر نشاسته تهیه شد. جزئیات نمونه‌ها و مقادیر وزنی اجزا آن‌ها بر حسب گرم در ۱۰۰ گرم محلول در جدول ۱ آورده شده است. برای این منظور، ابتدا محلول صمغ دانه شاهی در حضور و یا غیاب ساکارز توسط آب دیونیزه حاوی ۰/۰۲٪ سدیم آزید آماده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا به‌طور کامل هیدراته شود. پودر نشاسته گندم به مقدار لازم به محلول صمغ دانه شاهی- ساکارز اضافه شد و توسط مگنت بر روی استیرر (مدل MR Hei-Tec) Heidolph)، ساخت آلمان) به مدت ۳۰ دقیقه در دور پایین (۵۰ rpm) در دمای محیط هم زده شد. به منظور تولید ژل نشاسته، ابتدا سوسپانسیون آماده شده داخل محفظه استوانه‌ای از جنس استیل زنگ نزن مجهز به گرمکن و چرخش آب منتقل شد و سپس درب ظرف همراه با پروب همزن درون آن قرار گرفت و کاملاً بسته شد. نمونه‌ها در این سیستم درحالی که با سرعت ۱۶۰ rpm توسط همزن مکانیکی (Digital Electric Mixer، ساخت ایران) به‌طور پیوسته مخلوط می‌شدند از دمای ۲۵ تا ۹۵ ^{o}C با سرعت ۹ ^{o}C بر دقیقه گرم شدند و به مدت ۳ دقیقه در دمای ۹۵ ^{o}C نگهداری شده و سپس با سرعت ۱۰ ^{o}C بر دقیقه تا دمای ۵۰ ^{o}C سرد شدند. در نهایت ژل نشاسته از سرد کردن خمیر حاصل به مدت ۱ ساعت در دمای محیط (۲۵ ^{o}C) به دست آمد. نمونه شاهد نیز از مخلوط نشاسته گندم با آب دیونیزه مطابق شرایط فوق‌الذکر تهیه شد.

جدول ۱- تیمارهای تحقیق شامل سطوح هر تیمار و مقدار وزنی اجزای تشکیل دهنده

Table 1- The treatments including the levels of each treatment and the weight amount of the components (Native wheat starch (NWS), Crees seed gum (CSG) and Sucrose (SUC))

نمونه Sample	صمغ CSG (%)	ساکارز SUC (%)	اجزا Components (g/100g)		
			نشاسته گندم NWS	صمغ CSG	ساکارز SUC
1		0	4	0	0
2	0	5	3.8	0	0.2
3		10	3.6	0	0.4
4		0	3.8	0.2	0
5	5	5	3.6	0.2	0.2
6		10	3.4	0.2	0.4
7		0	3.6	0.4	0
8	10	5	3.4	0.4	0.2
9		10	3.2	0.4	0.4
10		0	3.4	0.6	0
11	15	5	3.2	0.6	0.2
12		10	3	0.6	0.4

اندازه‌گیری قدرت تورم و حلالیت

اندازه‌گیری قدرت تورم و حلالیت به روش داس سانتوس و همکاران (Dos santos *et al.*, 2019) با کمی تغییرات انجام شد. ۰/۶ گرم از نمونه پودر (نشاسته یا مخلوط نشاسته با ساکارز و صمغ دانه شاهی) با ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر درون لوله سانتریفیوژ مخلوط شده و در دمای ۹۵ ^{o}C به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد. سپس فوراً تا دمای اتاق سرد شده و در ۵۶۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. به دقت مایع شفاف رویی[1] به پلیت توزین شده منتقل شد و در دمای ۱۰۵ ^{o}C خشک گردید. درصد حلالیت از تقسیم سوپرناتانت خشک شده به وزن اولیه نمونه پودر محاسبه شد. رسوب باقی‌مانده نیز توزین شد و از تقسیم وزن رسوب به وزن اولیه نمونه پودر، قدرت تورم (گرم/گرم) به دست آمد (Dos santos *et al.*, 2019).

تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی

1- Supernatent

جهت تصویربرداری ابتدا نمونه‌های ژل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ ºC نگهداری شدند. سپس توسط نیتروژن مایع عمل انجماد سریع صورت گرفت. آنگاه توسط دستگاه خشک‌کن انجمادی در دمای ۴۰- ºC به مدت ۴۸ ساعت کاملاً خشک شدند. مقدار کمی از نمونه‌های خشک شده توسط دستگاه Sputter Coater (مدل SC7620) با طلا پالادیوم به مدت ۲۲۰ ثانیه پوشش دهی شدند. تصویربرداری از ژل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (مدل LEO1450 VP، ساخت آلمان) با وضوح (قدرت تفکیک) nm ۲/۵ تحت ولتاژ kv ۲۰ در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر انجام گردید (Kaur *et al.*, 2008). همچنین متوسط قطر حفرات توسط نرم افزار ImageJ Luncher محاسبه گردید، بدین صورت که ۱۰ حفره به صورت تصادفی از هر تصویر انتخاب شد سپس قطر آن‌ها توسط ابزار اندازه‌گیری طول موجود در نرم‌افزار اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها گزارش گردید.

ارزیابی کنتیک بیات شدن

کنتیک بیاتی با توجه به تغییرات سختی بافت نمونه‌ها در طی زمان نگهداری ارزیابی شد. سختی بافت نمونه‌های ژل با استفاده از دستگاه بافت‌سنج بروکفیلد (Brookfield CT3-10Kg, US) از طریق آزمون اکستروژن پس‌رو تعیین شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تا ارتفاع ۱۶ میلی‌متر درون ظروف استوانه‌ای پلاستیکی با ابعاد ۴۵×۲۹ میلی‌متر ریخته شد. بافت نمونه‌ها پس از سرد شدن به مدت ۱ ساعت در دمای محیط و پس از نگهداری به مدت ۰، ۱، ۷ و ۱۴ روز در دمای ۴ ºC ارزیابی شد. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت قبل از انجام آزمون از یخچال خارج شدند تا به دمای محیط برسند. آزمون توسط پروب استوانه‌ای (با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر) با سرعت mm/s ۱ تا رسیدن به کرنش ۵۰٪ انجام گردید. پارامتر سختی (حداکثر نیرو طی مرحله بارگذاری) (g) توسط نرم‌افزار TA از منحنی نیرو-زمان استخراج شد. در نهایت به منظور ارزیابی کنتیک بیاتی نشاسته، تغییرات سختی طی زمان نگهداری توسط معادله‌ی ساده شده‌ی آورامی[1] (رابطه ۱) برازش داده شد (Berski *et al.*, 2018):

$$H_t = H_\infty - (H_\infty - H_0) \times e^{-kt} \qquad \text{(۱) رابطه}$$

که در این معادله H_0، H_∞ و H_t به ترتیب سختی نمونه‌ها بر حسب گرم (g) در زمان‌های صفر، بی‌نهایت و t می‌باشند و k بر حسب (1/s) ثابت سرعت بیات شدن است.

اندازه‌گیری آب‌اندازی ژل

آب‌اندازی ژل نشاسته گندم به تنهایی و در حضور صمغ دانه شاهی و یا ساکارز طبق روش فونامی و همکاران (Funami *et al.*, 2005) با کمی تغییرات تعیین شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌های ژل، خمیر به‌صورت داغ به مقدار ۱۰ گرم در فالکون ml ۱۵ وزن شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط، فالکون‌ها به یخچال منتقل شدند. نمونه‌ها به مدت ۰، ۱، ۷ و ۱۴ روز در دمای ºC ۴ نگهداری شدند. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت قبل از انجام آزمون از یخچال خارج شدند تا به دمای محیط برسند. سپس در ۳۰۰۰g به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط سانتریفیوژ (Hettich EBA 20 Centrifuge) انجام شد. درصد آب‌اندازی از رابطه ۲ به دست آمد.

$$\text{درصد آب‌اندازی} = \frac{\text{وزن مایع تفاف رویی}}{\text{وزن اولیه نمونه}} \times 100 \qquad \text{(۲) رابطه}$$

طرح آزمایشی و تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش اثر تیمارهای صمغ دانه شاهی در سطوح جایگزینی (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵٪)، ساکارز در سطوح جایگزینی (صفر، ۵ و ۱۰٪) بر خصوصیات ژل نشاسته گندم به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور آزمون‌ها در ۳ تکرار انجام شدند. تحلیل نتایج داده‌ها توسط آنالیز واریانس (ANOVA) صورت گرفت و میانگین‌ها به روش آزمون توکی[2] در سطح آماری ۵٪ مقایسه شدند. به‌منظور رسم نمودارها و آنالیز آماری داده‌ها از نرم‌افزارهای Excel و Minitab (نسخه ۱۷) استفاده شد. برازش مدل آورامی با استفاده از جعبه ابزار برازش نرم‌افزار متلب (نسخه 2016a) انجام گردید.

نتایج و بحث

قدرت تورم و شاخص حلالیت

پارامتر قدرت تورم بیانگر توانایی گرانول‌های نشاسته در هیدراته شدن طی فرآیند پختن و حرارت‌دهی در ºC ۹۰ می‌باشد. قدرت تورم نشاسته گندم در محدوده g/g ۱۲/۶۴ تا ۱۶/۷۵ گزارش شده است (Kumar and Khatkar, 2017). همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌کنید، قدرت تورم نشاسته گندم در این پژوهش g/g ۱۳/۱۱ تخمین زده شد. در حضور صمغ دانه شاهی و با افزایش غلظت جایگزینی صمغ تا ۱۵٪، قدرت تورم نشاسته به صورت چشمگیر به میزان ۶۹٪ افزایش پیدا کرد. در این راستا نتایج مشابهی توسط تکاویفارات و همکاران (Techawipharat *et al.*, 2008)، چیاسونگ و سوفانتاریکا (Chaisawang and Suphantharika, 2006) و

1- Simplified Avrami equation

2- Tukey test

بایاس و ماندالا (Bayas and Mandala, 2004) گزارش شده است. این محققان یافتند قدرت تورم نشاسته در حضور هیدروکلوئیدها افزایش پیدا می‌کند. متیا مرینو و همکاران (Matia-Merino *et al.*, 2019) مشاهده کردند که افزایش غلظت صمغ زانتان و صمغ دانه ریحان اثر بسزایی در افزایش قدرت تورم نشاسته ذرت معمولی داشت. همچنین میرنژادعنبرانی و همکاران (Mirnezhad Anbarani *et al.*, 2021) یافتند که افزایش غلظت جایگزینی صمغ دانه مرو منجر به افزایش قدرت تورم نشاسته معمولی گندم شد. هیدروکلوئیدها از طریق تقویت برهمکنش مولکول‌های نشاسته باعث فشرده‌تر شدن شبکه گرانولی می‌شوند و این امر باعث افزایش نیروهای وارده بر آن‌ها شده و ورود آب به داخل شبکه گرانولی را تسهیل می‌کند و منجر به افزایش قدرت تورم گرانول‌های نشاسته می‌شود. این امر حل شدن و نشت آمیلوز به فاز پیوسته را نیز تسهیل می‌کند اما آمیلوز نشت یافته و هیدروکلوئید در فاز پیوسته یک فیلم در اطراف گرانول‌ها ایجاد می‌کنند و از تورم بیشتر و نشت پلیمرها جلوگیری می‌کنند (Techawipharat *et al.*, 2008; Mandala and Bayas, 2004). با افزایش غلظت ساکارز تا ۱۰٪، میزان قدرت تورم نشاسته گندم ۱۱٪ کاهش یافت. گونارانتن و همکاران (Gunarantne *et al.*, 2007) گزارش کردند که قدرت تورم نشاسته‌های گندم و سیب‌زمینی در غلظت بیش از ۲۰٪ قند، به ویژه ساکارز کاهش یافته است، اما چن و همکاران (Chen *et al.*, 2014) یافتند که با افزایش غلظت قندهای ساکارز و گلوکز تا ۲٪ قدرت تورم به‌طور معنادار کاهش پیدا کرد. ساکارز از طریق محدود کردن تحرک و انعطاف‌پذیری زنجیره‌های نشاسته منجر به کاهش قدرت تورم نشاسته گندم شده است. بدین طریق که پل‌هایی بین زنجیره‌های نشاسته و مولکول‌های قند تشکیل شده و متورم شدن گرانول‌های نشاسته را محدود کرده است (Chen *et al.*, 2014; Gunarantne *et al.*, 2007). نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهند هر چند حضور ساکارز در نمونه‌های ژل مخلوط باعث کاهش مقادیر قدرت تورم مخلوط نشاسته–صمغ شده است، اما حضور صمغ دانه شاهی از اثرات منفی قند جلوگیری کرده است و نمونه‌های مخلوط دارای مقادیر قدرت تورم بالاتری در مقایسه با نشاسته معمولی گندم هستند. چن و همکاران (Chen *et al.*, 2014) نیز نتایج مشابهی را ارائه دادند. آن‌ها گزارش کردند که افزایش غلظت پلی‌ساکارید بذر کتان باعث افزایش قدرت تورم مخلوط نشاسته سیب‌زمینی– قندها به ویژه ساکارز شد.

حلالیت نشاسته به معنای از دست دادن نظم مولکولی در درون گرانول‌ها و افزایش مواد جامد محلول در فاز پیوسته می‌باشد. حلالیت نشاسته معمولی گندم در دمای ۹۵ ^{o}C حدود ۵ تا ۷٪ گزارش شده است (Abedi *et al.*, 2019; Mandala and Bayas, 2004). در این پژوهش حلالیت نشاسته گندم حدود ۸٪ به دست آمد (جدول ۲). نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهند که حلالیت گرانول‌های نشاسته تحت تأثیر جایگزینی صمغ دانه شاهی و ساکارز قرار گرفته است. از نظر آماری جایگزینی آن‌ها بر تغییرات درصد حلالیت معنی‌دار نبود اما حضور صمغ دانه شاهی در سیستم منجر به افزایش چشمگیر درصد حلالیت نشاسته گندم شد و مقدار آن از حدود ۸٪ به ۲۱٪ رسید. بایاس و ماندالا (Bayas and Mandala, 2004) و تکاویفارات و همکاران (Techawipharat *et al.*, 2008) نیز گزارش کردند که افزودن صمغ‌های زانتان، کاراگینان و مشتقات سلولز به ترتیب به محلول نشاسته گندم و نشاسته برنج باعث افزایش درصد حلالیت و مواد جامد محلول در فاز پیوسته شدند. افزایش درصد حلالیت نشاسته در حضور هیدروکلوئیدها توسط لطفی و همکاران (Lutfi *et al.*, 2017) نیز گزارش شده است. هرچند که با افزایش غلظت صمغ از ۵ تا ۱۰ و ۱۵٪، این افزایش مقدار، به ترتیب از ۲۱٪ به حدود ۲۰٪ و ۱۶٪ کاهش یافت اما همچنان بالاتر از نشاسته گندم بود. این پدیده می‌تواند به این علت باشد که طی افزایش غلظت صمغ، آمیلوز نشت یافته و صمغ از طریق تشکیل فیلم اطراف گرانول‌های نشاسته (Techawipharat *et al.*, 2008) از انحلال بیشتر گرانول‌ها و خروج مواد به فاز پیوسته جلوگیری کرده‌اند. با افزایش غلظت قند از ۰ تا ۱۰٪، حلالیت نشاسته از ۸/۲۸٪ به ۱۶/۶۷٪ افزایش یافت (جدول ۲). به عبارت دیگر جایگزینی صمغ و قند با نشاسته گندم، منجر به افزایش مقدار مواد جامد محلول در فاز پیوسته شد. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که اثر حضور صمغ دانه شاهی در مقایسه با حضور ساکارز بر حلالیت بیشتر بود.

ساختمان میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ساختمان ژل‌ها از نظر تراکم و پیوستگی و همچنین اندازه حفرات ساختمان ژل تهیه شدند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱ و جدول ۳، ساختمان ژل نشاسته گندم (الف) به‌صورت یک شبکه متخلخل با متوسط اندازه حفرات ۳۳/۰۱ μm (ساختمان لانه‌زنبوری) مشاهده شد. سان و همکاران (Sun *et al.*, 2015) نیز ساختمان متراکم لانه‌زنبوری را برای ژل نشاسته گندم گزارش دادند. با جایگزینی صمغ دانه شاهی و ساکارز، تفاوت‌های آشکاری در میکروساختمان ژل نشاسته گندم مشاهده شد. با افزودن صمغ دانه شاهی پیوستگی ساختمان ژل افزایش پیدا کرد و اندازه حفرات کوچک‌تر شد که این تغییرات در غلظت بالای صمغ (۱۵٪) بسیار چشمگیر بود، به‌طوری که متوسط قطر حفرات از ۳۳/۰۱ μm به ۲۹/۴۴ μm کاهش یافت (جدول ۳، شکل ۱: ت، ج و د).

جدول ۲- قدرت تورم و حلالیت ژل نشاسته گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز

Table 2- Swelling power (SP) and solubility index (SI) of native wheat starch gel (NWS, 4%) In the presence of cress seed gum (CSG) and sucrose (SUC)

صمغ CSG (%)	ساکارز SUC (%)	پارامترها Parameters: قدرت تورم SP (g/g)	حلالیت SI (%)
0	0	13.11±0.84[ef]	8.28±2.11
	5	12.03±0.41[f]	11.67±1.67
	10	11.66±0.22[f]	16.67±0.00
5	0	15.74±0.14[cd]	21.11±0.96
	5	14.82±0.31[de]	24.45±1.93
	10	14.39±0.41[de]	26.61±0.10
10	0	18.15±0.16[b]	20.56±0.96
	5	17.60±1.03[b]	20.89±0.84
	10	17.41±1.24[bc]	25.33±1.76
15	0	22.17±0.34[a]	16.67±1.67
	5	21.72±0.57[a]	17.50±0.83
	10	19.12±0.24[b]	22.15±1.87

بنابراین صمغ دانه شاهی می‌تواند در ایجاد ساختمان در محصولات غذایی بر پایه نشاسته نقش داشته باشد. کائور و همکاران (Kaur *et al*., 2008) طی بررسی میکروساختمان‌های نشاسته ذرت و نشاسته ذرت-صمغ کاسیا نتایج مشابهی را گزارش دادند. آن‌ها بیان کردند با افزایش غلظت صمغ کاسیا ماتریکسی از صمغ-آمیلوز فضاهای بین گرانول‌ها را پوشانده و یک ساختمان لانه‌زنبوری منظمی را تشکیل داده‌اند.

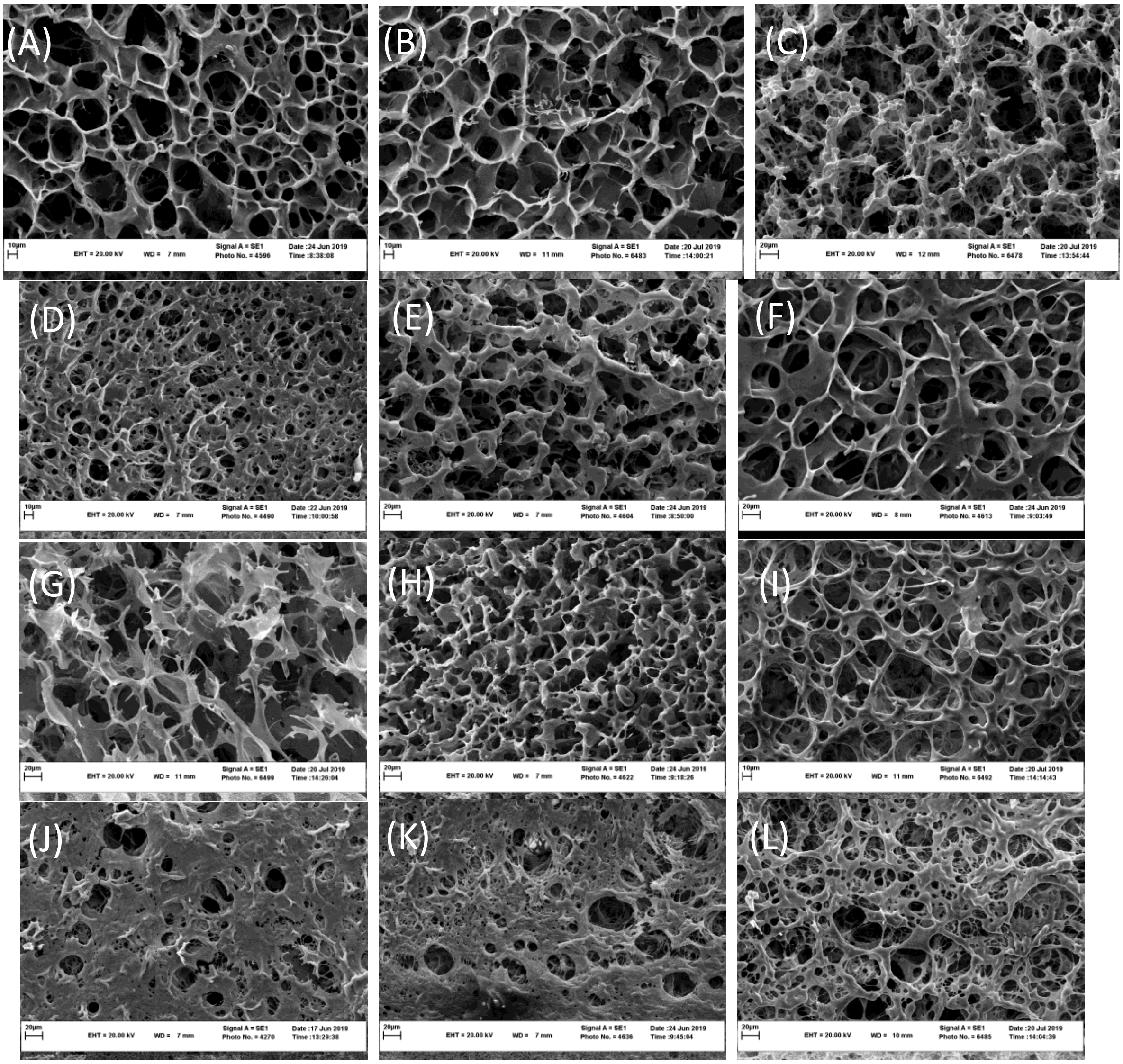
در حضور ساکارز به‌خصوص در غلظت بالای آن (۱۰٪)، پیوستگی ساختمان ژل نشاسته گندم بسیار کم شد و ساختمان تضعیف گردید و اندازه حفرات آن نیز بزرگ‌تر شد به‌طوری که با جایگزینی ۵ و ۱۰٪ ساکارز، متوسط قطر حفرات به ترتیب به µm ۳۸/۰۹ و µm ۴۵/۳۷ تغییر یافت (جدول ۳، شکل ۱: ب و پ). در ژل‌های مخلوط حاوی هر دو ترکیب صمغ و قند، مشاهده می‌شود که باوجود اینکه ساکارز از پیوستگی ساختمان ژل‌های حاوی نشاسته-صمغ کاسته است اما حضور صمغ باعث شده اثر منفی قند بر ساختمان ژل نشاسته کم شود و از تضعیف ساختمان ژل جلوگیری کرده است. به‌خصوص در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ صمغ دانه شاهی و ۵٪ ساکارز نسبت به نمونه شاهد ساختمانی پیوسته‌تر و با حفرات خیلی کمتر مشاهده شد (شکل ۱، د). اندازه‌گیری قطر حفرات نشان داد که ژل‌های مخلوط در ساختمان خود دارای حفراتی با متوسط قطر در محدوده‌ی µm ۵۶/۸۵ تا ۸۷/۲۰ می‌باشند. اما در نمونه‌ی مخلوط حاوی ۱۵٪ صمغ و ۵٪ قند متوسط قطر حفرات µm ۳۱/۳۴ برآورد شد که در مقایسه با ژل نشاسته اندازه آن‌ها کوچکتر است.

کنتیک بیاتی

کنتیک بیات شدن ژل نشاسته گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز با برازش داده‌های سختی-زمان توسط معادله آورامی مطالعه شد. پارامترهای معادله آورامی در جدول ۴ ارائه شده اند. سختی ژل نشاسته معمولی گندم در زمان صفر (H_0) و زمان بی‌نهایت (H_∞) به ترتیب حدود g ۴۷ و g ۱۷۳ برآورد شد. مقدار سختی ژل نشاسته گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز کاهش یافت. در کاهش سختی در زمان بی‌نهایت افزایش غلظت صمغ بسیار مؤثرتر بود و میزان آن در بالاترین غلظت صمغ (۱۵٪) حدود ۶۲٪ و در بالاترین غلظت قند (۱۰٪) حدود ۳۵٪ کاهش یافت. کاهش چشمگیر در سختی در زمان بی‌نهایت نمونه‌های مخلوط نشاسته-صمغ-قند به خصوص در غلظت ۱۵٪ صمغ مشاهده شد.

پارامتر k بیانگر سرعت بیات شدن نشاسته می‌باشد. افزایش غلظت جایگزینی صمغ دانه شاهی از ۵ تا ۱۵٪ به استثنای غلظت ۱۰٪ منجر به کاهش سرعت بیاتی ژل نشاسته معمولی گندم طی مدت ۱۴ روز نگهداری در دمای ۴ °C شد (جدول ۴)، به‌طوری که در غلظت ۱۵٪، سرعت آن به میزان ۴۸٪ کاهش یافت. فونامی و همکاران (Funami *et al*., 2005) نیز به نتایج مشابهی مبنی بر کاهش ثابت سرعت بیات شدن مخلوط نشاسته/پلی‌ساکاریدهای گوار، تارا، کنجاک و لوبیای اقاقیا نسبت به نشاسته گندم بعد از ۱۴ روز نگهداری در دمای ۴ °C رسیدند. میرنژادعنبرانی و همکاران (Mirnezhad Anbarani *et al*., 2021) نیز در جایگزینی ۵٪ صمغ دانه مرو با نشاسته گندم کاهش سرعت بیاتی ژل نشاسته و در جایگزینی ۱۰٪ صمغ افزایش سرعت را مشاهده کردند. همچنین با

جایگزینی ساکارز سرعت بیات شدن نشاسته کاهش پیدا کرد که جایگزینی ۵٪ قند نسبت به ۱۰٪ موثرتر بود. در غلظت ۵٪ ساکارز تقریباً ۲۴٪ کاهش و در غلظت ۱۰٪ ساکارز تقریباً ۵٪ کاهش در سرعت بیاتی نشاسته مشاهده شد (جدول ۴). در نمونه‌های مخلوط نیز با برهمکنش صمغ دانه شاهی و ساکارز به خصوص در غلظت ۱۵٪ صمغ و ۵٪ قند، کاهش تقریباً ۴۳ درصدی در سرعت کریستالیزاسیون مجدد (بیات شدن) مشاهده شد. زهنگ و همکاران (Zhang *et al*., 2017) و برسکی و همکاران (Berski *et al*., 2018) به ترتیب نتایج مشابهی را مبنی بر کاهش سرعت کریستالیزاسیون مجدد ژل نشاسته تاپیوکا با افزودن قندهای ساکارز، ترهالوز و گلوکز و ژل نشاسته گندم با افزایش غلظت شربت گلوکز گزارش کردند.



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ژل نشاسته گندم (الف)، ۵٪ S (ب)، ۱۰٪ S (پ)، ۵٪ G (ت)، ۱۰٪ G (چ)، ۱۵٪ G (د)، ۵٪ G–۵٪ S (ث)، ۵٪ G–۱۰٪ S (ج)، ۱۰٪ G–۵٪ S (ح)، ۱۰٪ G–۱۰٪ S (خ)، ۱۵٪ G–۵٪ S (ذ)، ۱۵٪ G–۱۰٪ S (ر).

S، درصد جایگزینی ساکارز و G، درصد جایگزینی صمغ دانه شاهی

Fig. 1- Scanning electron micrographs (SEM) of native wheat starch gel (A) with 5%S (B), 10%S (C), 5%G (D), 10%G (G), 15%G (J), 5%G-5%S (E), 5%G-10%S (F), 10%G-5%S (H), 10%G-10%S (I), 15%G-5%S (K), 15%G-10%S (L).
S, sucrose and G, cress seed gum

جدول ۳- متوسط قطر حفرات ساختمان ژل نشاسته گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز

Table 3- Mean pores diameter values for native wheat starch gel containing cress seed gum (CSG) and sucrose (SUC)

صمغ CSG (%)	ساکارز SUC (%)	متوسط قطر حفرات Mean pore diameter (μm)
0	0	33.01±9.09[d]
	5	38.09±16.89[cd]
	10	45.37±11.43[cd]
5	0	30.10±4.91[d]
	5	87.20±19.20[a]
	10	92.14±12.45[a]
10	0	79.00±6.21[ab]
	5	33.89±10.35[d]
	10	88.18±17.79[a]
15	0	29.44±6.81[d]
	5	31.34±16.31[d]
	10	56.85±17.42[bc]

وسعت یا بزرگی بیات شدن نمونه‌های ژل توسط پارامتر $H_{\infty}H_0/H_0$ ارزیابی شد. با توجه به جدول ۴، میزان وسعت بیاتی ژل نشاسته ۲/۶۳ برآورد شد که با افزایش غلظت صمغ دانه شاهی و ساکارز مقدار آن کاهش یافت و در حداکثر غلظت‌های جایگزینی صمغ بدون حضور ساکارز (۱۵٪) به ۰/۴۸ و قند بدون حضور صمغ (۱۰٪) به ۲/۰۶ رسید. نتایج این تحقیق نشان داد که صمغ دانه شاهی منجر به افزایش حلالیت نشاسته و افزایش مواد جامد محلول در فاز پیوسته شد اما احتمالاً آمیلوز نشت یافته و هیدروکلوئید در فاز پیوسته یک فیلم در اطراف گرانول‌ها ایجاد می‌کنند که از نشت بیشتر مولکول‌های آمیلوز جلوگیری می‌کنند و یا به علت برهمکنش با یکدیگر از به‌هم پیوستن مجدد مولکول‌های آمیلوز جلوگیری می‌کنند که منجر به کاهش وسعت بیاتی شده است. برسکی و همکاران (Berski *et al.*, 2018) نیز گزارش کردند وسعت بیات شدن نشاسته گندم با افزودن شربت گلوکز به سیستم به دلیل محدود شدن نشت مولکول‌های آمیلوز از گرانول‌ها کاهش یافت.

جدول ۴- پارامترهای معادله آورامی برای ارزیابی کنتیک بیاتی ژل نشاسته گندم در حضور صمغ دانه شاهی و قند ساکارز

Table 4- The Avrami equation parameters determined for retrogradation kinetic of native wheat starch gel in the presence of cress seed gum (CSG) and sucrose (SUC)

صمغ CSG (%)	ساکارز SUC (%)	پارامترها Parameters H_0 (g)	H_{∞} (g)	H_{∞}–H_0/H_0	k (1/s)	R^2
0	0	47.74±1.47[a]	173.40±14.28[a]	2.63±0.19[b]	0.101±0.021[abcde]	0.960
	5	44.79±0.58[abc]	152.40±10.32[a]	2.40±0.27[b]	0.076±0.005[def]	0.942
	10	36.50±3.10[e]	111.50±5.66[a]	2.06±0.10[b]	0.096±0.020[bcdef]	0.978
5	0	44.96±1.40[ab]	171.60±10.04[a]	2.82±0.10[b]	0.073±0.011[def]	0.905
	5	38.81±2.09[de]	143.30±5.66[a]	2.70±0.34[b]	0.085±0.006[cdef]	0.937
	10	38.47±0.14[de]	186.00±15.84[a]	3.84±0.43[a]	0.028±0.002[f]	0.970
10	0	43.91±2.60[abcd]	77.66±2.54[a]	0.77±0.16[c]	0.168±0.00[a]	0.992
	5	41.07±0.12[bcde]	63.27±4.33[a]	0.54±0.10[c]	0.139±0.001[abcd]	0.974
	10	39.01±0.52[cde]	47.85±1.71[a]	0.23±0.06[c]	0.157±0.006[ab]	0.979
15	0	44.33±0.71[abcd]	65.81±0.71[a]	0.48±0.01[c]	0.052±0.001[ef]	0.975
	5	42.25±0.34[abcde]	58.63±7.42[a]	0.39±0.19[c]	0.057±0.035[ef]	0.957
	10	38.83±0.43[de]	44.11±1.17[a]	0.14±0.04[c]	0.154±0.04[abc]	0.973

نتایج به‌صورت میانگین ± انحراف معیار برای سه تکرار است. میانگین‌های با حروف یکسان اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p>0/05$).

All data are expressed as mean ± standard deviation of three determinations. Values followed by the same letters show no significant differences (P > 0.05).

همان‌طور که مشاهده شد، افزایش غلظت ساکارز منجر به کاهش قدرت تورم و افزایش حلالیت و مواد جامد محلول در فاز پیوسته شد، اما احتمالاً قندها با قرارگیری در فاز پیوسته و در لابه‌لای مولکول‌های آمیلوز یا به علت واکنش با آن‌ها از به‌هم پیوستن آن‌ها جلوگیری کرده و منجر به کاهش وسعت بیاتی شده اند. برهمکنش صمغ دانه شاهی و ساکارز در نمونه‌های مخلوط باعث کاهش بیشتر این وسعت شد که این تغییرات را می‌توان در نمونه‌های مخلوط حاوی بیش از ۱۰٪ صمغ به خوبی مشاهده کرد. مقدار وسعت بیات شدن از ۲/۶۳ (مربوط به ژل نشاسته) به ۰/۳۹ و ۰/۱۴ که به ترتیب مربوط به نمونه‌های مخلوط حاوی ۱۵٪ صمغ-۵٪ قند و ۱۵٪ صمغ-۱۰٪ قند می‌باشند، رسید.

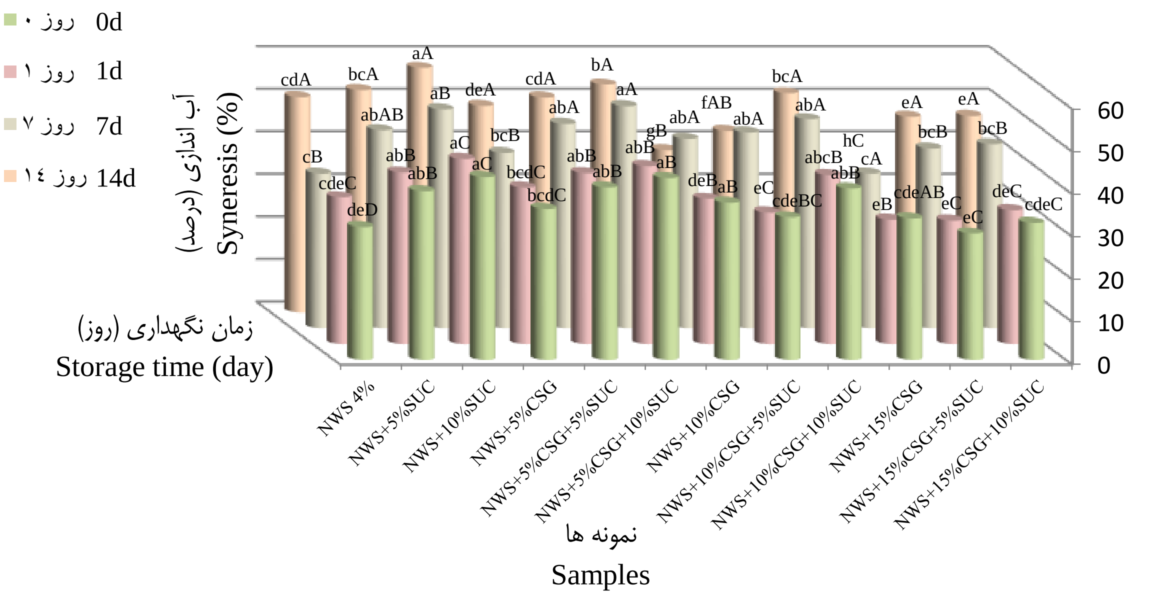
آب‌اندازی

آب‌اندازی نمونه‌های ژل جهت بررسی میزان و سرعت بیاتی آن‌ها طی زمان نگهداری اندازه‌گیری شد. طی نگهداری ژل نشاسته گندم، به دلیل به‌هم پیوستن مجدد مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین، شبکه پلیمری با کریستال‌های نوع B تشکیل می‌شود و به دنبال آن استحکام شبکه (سختی) به‌تدریج افزایش می‌یابد، از طرفی جدایی فاز بین حلال و زنجیره‌های پلیمر اتفاق می‌افتد، در نتیجه باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب (یا توسعه آب‌اندازی) می‌شود (Biliaderis, 2009). نتایج ارائه شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که آب‌اندازی ژل نشاسته گندم بلافاصله بعد از تولید و بعد از نگهداری به مدت ۱، ۷ و ۱۴ روز در دمای $4\ ^{o}C$ افزایش پیدا کرد و مقدار آن به ترتیب از حدود ۳۱٪ به ۳۴٪، ۳۶٪ و ۵۰٪ رسید؛ اما رفتار متفاوتی از تغییرات آب‌اندازی در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز مشاهده شد. بلافاصله بعد از تولید، جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵٪ نشاسته با صمغ دانه شاهی باعث افزایش بسیار جزئی آب‌اندازی از ۳۱٪ به ۳۳٪ شد. اما بعد از ۱ روز نگهداری، در نمونه‌های مخلوط نشاسته-صمغ، با افزایش غلظت جایگزینی صمغ تا سطح ۱۵٪، کاهش چشمگیر آب‌اندازی از حدود ۳۴٪ به ۲۹٪ مشاهده شد. بعد از یک هفته نگهداری نمونه‌های ژل در دمای $4\ ^{o}C$، برخلاف انتظار، ژل حاوی ۱۵٪ صمغ دانه شاهی دارای آب‌اندازی معادل با ژل نشاسته گندم به تنهایی داشت و بقیه نمونه‌ها دارای آب‌اندازی بالاتری در مقایسه با ژل نشاسته داشتند. طی مدت ۱۴ روز نگهداری، افزایش غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵٪ صمغ اثر بسزایی در کاهش آب‌اندازی ژل نشاسته داشت و مقدار آن را از حدود ۵۰٪ به ترتیب به ۴۸٪، ۳۸٪ و ۲۳٪ کاهش داد. نتایج نشان دادند که حضور صمغ بر سرعت بیات شدن در هفته اول تأثیری چندانی نداشت و حتی نسبت به نمونه شاهد بیشتر هم شد، اما در هفته دوم نگهداری سرعت آن کاهش یافت. پلی ساکاریدها ابتدا با تشکیل یک مانع یا فیلم اطراف گرانول‌های نشاسته از تورم گرانول‌ها (هیدراته شدن کامل) جلوگیری می‌کنند و ظرفیت نگهداری آب را کاهش می‌دهند (یعنی باعث افزایش آب‌اندازی می‌شوند) (Funami *et al.*, 2008; Lutfi *et al.*, 2017). از طرفی هیدروکلوئیدها ظرفیت نگهداری آب بالایی دارند، لذا احتمالاً نگهداری در دمای پایین باعث اتصال مولکولی بین زنجیره مانان در صمغ دانه شاهی شده درنتیجه یک شبکه پلیمری تشکیل می‌شود که مولکول‌های آب را در خود به دام می‌اندازد و از خروج مولکول‌های آب جلوگیری می‌کند (Naji and Razavi, 2014). بدین ترتیب میزان آب در دسترس جهت کریستاله شدن مجدد مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین را کاهش می‌دهد و از رتروگرداسیون نشاسته طی مدت‌زمان نگهداری طولانی جلوگیری می‌کند (Funami *et al.*, 2005). در این راستا فونامی و همکاران (Funami *et al.*, 2005) نتایج مشابهی را مبنی بر کاهش آب‌اندازی ژل نشاسته گندم در حضور پلی‌ساکاریدهای گوار، تارا، کنجاک گلوکومانان و صمغ لوبیای اقاقیا بعد از نگهداری در $4\ ^{o}C$ به مدت ۱۴ روز ارائه دادند.

اندازه‌گیری آب‌اندازی نمونه‌های ژل نشاسته حاوی قند در دمای محیط (بلافاصله بعد از تولید) نشان داد جایگزینی ۵ و ۱۰٪ ساکارز به طور چشمگیر منجر به افزایش آب‌اندازی از ۳۱٪ به ۴۲٪ شده است و پس از یک روز نگهداری در دمای $4\ ^{o}C$، مقدار آب‌اندازی ژل نشاسته گندم از حدود ۳۴٪ به ۴۳٪ رسید. مقدار آب‌اندازی ژل‌های نشاسته در حضور ۵ و ۱۰٪ قند در طی ۷ روز نگهداری در دمای $4\ ^{o}C$ به ترتیب از ۳۶٪ به ۴۶٪ و ۵۱٪ افزایش یافت. پس از گذشت ۱۴ روز نگهداری نمونه‌های ژل در دمای $4\ ^{o}C$ نیز مقدار آب‌اندازی آن‌ها از ۵۰٪ به ترتیب به ۵۲٪ و ۵۷٪ افزایش یافت. اگرچه با افزایش غلظت جایگزینی ساکارز تا ۱۰٪، به علت ظرفیت نگهداری آب پایین قند، میزان آب‌اندازی ژل در تمامی روزهای نگهداری افزایش یافته است. مقدار افزایش آب‌اندازی برای ژل نشاسته معمولی گندم در هفته اول حدود ۵٪ و در هفته دوم حدود ۴۷٪ را نشان می‌دهد، درحالی که با ۵ و ۱۰٪ جایگزینی قند این درصدها به ترتیب به ۳۰-۱۵٪ و ۳۲-۱۸٪ تغییر پیدا کرد. می‌توان این‌گونه استنباط کرد که سرعت بیاتی ژل نشاسته گندم در حضور ساکارز در مدت ۱۴روز نگهداری کاهش یافته است. در این راستا، نتایج ارائه شده در این پژوهش مطابق با یافته‌های کارینز و همکاران (Cairns *et al.*, 1991) بود. آن‌ها بیان کردند در حضور ساکارز کریستالیزاسیون مجدد آمیلوپکتین ژل نشاسته گندم طی ۳۰ روز نگهداری کاهش یافت که بیانگر کاهش بیات شدن بلند مدت بود. همچنین زهنگ و

همکاران (Zhang *et al.*, 2017) دریافتند که سرعت کریستالیزاسیون مجدد ژل نشاسته تاپیوکا در حضور ساکارز طی ۲۸ روز نگهداری کاهش پیدا کرد. احتمالاً مولکول‌های ساکارز به علت رقابت بر سر مولکول‌های آب با مولکول‌های نشاسته گندم، آب را از دسترس مولکول‌های آمیلوپکتین خارج می‌کنند (Gunaratne *et al.*, 2007) و باعث کندتر شدن کریستالیزاسیون بلند مدت می‌شوند.

درصد آب‌اندازی نمونه‌های ژل مخلوط نشاسته–صمغ–قند در غلظت ۱۵٪ صمغ و ۵٪ قند بلافاصله بعد از تولید نسبت به ژل نشاسته گندم به صورت جزئی کاهش یافته است اما پس از ۱ روز نگهداری در دمای ۴ °C مقدار آن در این غلظت‌ها از حدود ۳۴٪ به ۲۸٪ رسید. درحالی که نگهداری نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای ۴ °C منجر به افزایش آب‌اندازی نمونه‌های مخلوط نشاسته–صمغ–قند نسبت به ژل نشاسته گندم شد. پس از ۱۴ روز نگهداری ژل‌های مخلوط سه جزئی در غلظت ۱۵٪ صمغ–۵ و ۱۰٪ قند به ترتیب دارای مقادیر آب‌اندازی حدود ۴۵٪ و ۴۶٪ بودند که در مقایسه با ژل نشاسته گندم کمتر بود. تغییرات آب‌اندازی ژل‌های مخلوط سه جزئی نشاسته–صمغ–قند طی مدت نگهداری نشان داد که حضور صمغ دانه شاهی در سیستم بر اثر منفی ساکارز (در هر دو غلظت آن) در افزایش آب‌اندازی ژل غلبه کرده است به‌طوری که با افزایش غلظت صمغ، افزایش آب‌اندازی ژل در اثر حضور قند، روند کندتری پیدا کرد.



شکل ۲- درصد آب‌اندازی ژل نشاسته معمولی گندم (NWS) در حضور صمغ دانه شاهی (CSG) و ساکارز (SUC) طی مدت‌زمان نگهداری (a-h، حروف غیر مشابه در هر ردیف بیانگر اختلاف معنی‌دار بین غلظت‌های جایگزینی صمغ و قند می‌باشد. A-D، حروف غیر مشابه در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار بین زمان‌های نگهداری می‌باشد)

Fig. 2- The values of syneresis (%) of native wheat starch (NWS) gel containing cress seed gum (CSG) and sucrose (SUC) during storage time

(a-h, means followed by the different letters in the each raw for substitution levels of CSG and SUC are significantly different ($P < 0.05$). A-D, means followed by the different letters in the each column for storage times are significantly different ($P < 0.05$))

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هدف مطالعه خواص عملکردی، ساختمان ژل، رفتار بیات شدن و میزان آب‌اندازی نشاسته معمولی گندم در حضور صمغ دانه شاهی و ساکارز بود. کنترل و تأخیر بیاتی و کاهش آب‌اندازی محصولات بر پایه نشاسته در حوزه صنعت مواد غذایی بسیار حائز اهمیت است. جایگزینی صمغ دانه شاهی باعث افزایش قدرت تورم و حلالیت نشاسته گندم شد، اما به دلیل واکنش با مولکول‌های نشاسته و تشکیل یک لایه فیلم در اطراف گرانول‌ها از نشت بیشتر مولکول‌های آمیلوز به فاز پیوسته جلوگیری کرده و از آنجایی که صمغ دانه شاهی ظرفیت نگهداری آب بالایی دارد، طی نگهداری نمونه‌های ژل در دمای ۴ °C، منجر به کاهش سرعت بیات شدن و میزان آب‌اندازی ژل نشاسته شد، که اثر آن در غلظت بالای جایگزینی مشهودتر بود. در مقابل ساکارز، احتمالاً به دلیل رقابت با مولکول‌های نشاسته بر سر آب موجود در سیستم و در نتیجه

جلوگیری از ژلاتینه شدن و تحرک مولکول‌های نشاسته، منجر به کاهش قدرت تورم شد و از طرف دیگر به دلیل کم بودن ظرفیت نگهداری آب توسط قند، منجر به افزایش آب‌اندازی ژل نشاسته گردید. بررسی رفتار بیاتی نشان داد که حضور قند باعث کاهش سرعت آن شده است. نمونه‌های مخلوط سه جزئی نشاسته–صمغ–قند قدرت تورم و حلالیت بالاتری در مقایسه با نمونه نشاسته و مخلوط نشاسته–قند داشتند. نمونه‌های ژل مخلوط به خصوص در غلظت ۱۵٪ جایگزینی صمغ دارای سرعت بیاتی و میزان آب‌اندازی کمتری در مقایسه با هر دو نمونه نشاسته گندم و مخلوط نشاسته–قند بودند. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که در سیستم سه تایی، صمغ با قند رقابت کرده و اثرات تضعیف کنندگی آن را بر خصوصیات ژل نشاسته کاهش داده است. در یک جمع بندی، جایگزینی ۱۵٪ نشاسته گندم با صمغ دانه شاهی و ۵٪ با ساکارز می‌تواند به طور موثر منجر به بهبود خصوصیات عملکردی و کاهش سرعت بیات شدن و میزان آب‌اندازی آن طی مدت نگهداری شود.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد (گرنت شماره ۳۴۸۵۱) و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (گرنت شماره ۹۶۰۱۵۵۴۰) بابت حمایت مالی و تجهیزاتی این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Abedi, E., Pourmohammadi, K., Jahromi, M., Niakousari, M., & Torri, L. (2019). The effect of ultrasonic probe size for effective ultrasound-assisted pregelatinized starch. *Food and Bioprocess Technology 12*(11): 1852-1862. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02347-2.
2. Bahnassey, Y.A., & Breene, W.M. (1994). Rapid Visco-Analyzer (RVA) pasting profiles of wheat, corn, waxy corn, Tapioca and Amaranth Starches (A. hypochondriacus and A cruentus) in the presence of Konjac flour, gellan, guar, xanthan and Locust bean gums. *Starch - Stärke 46*(4): 134-141. https://doi.org/10.1002/star.19940460404.
3. Behrouzian, F., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2014). Intrinsic viscosity of cress (*Lepidium sativum*) seed gum: Effect of salts and sugars. *Food Hydrocolloids* 35: 100-105. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.04.019.
4. BeMiller, J.N. (2011). Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations. *Carbohydrate Polymers 86*(2): 386-423. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.064.
5. Berski, W., Ziobro, R., Witczak, M., & GambuÂ´s, H. (2018). The retrogradation kinetics of starches of different botanical origin in the presence of glucose syrup. *International Journal of Biological Macromolecules* 114: 1288-1294. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.019.
6. Brennan, C.S., Suter, M., Matia-Merino, L., Luethi, T., Ravindran, G., Goh, K., & Ovortrup, J. (2006). Gel and pasting behaviour of fenugreek-wheat starch and fenugreek – wheat flour combinations. *Starch - Stärke 58*(10): 527-535. https://doi.org/10.1002/star.200600525.
7. Biliaderis, C.G. (2009). *Structural transitions and related physical properties of starch*. Third Edition ed. in: Starch: Chemistry and Technology (Eds.) J. BeMiller, R. Whistler, Academic Press. San Diego. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00008-2.
8. Biliaderis, C.G., Arvanitoyannis, I., Izydorczyk, M.S., & Prokopowich, D.J. (1997). Effect of hydrocolloids on gelatinization and structure formation in concentrated waxy maize and wheat starch gels. *Starch - Stärke 49*(7-8): 278-283. https://doi.org/10.1002/star.19970490706.
9. Cairns, P., I'Anson, K.J., & Morris, V.J. (1991). The effect of added sugars on the retrogradation of wheat starch gels by X-ray diffraction. *Food Hydrocolloids 5*(1): 151-153. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80302-0.
10. Chaisawang, M., & Suphantharika, M. (2006). Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids 20*(5): 641-649. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.06.003.
11. Chen, H.H., Wang, Y.S., Leng, Y., Zhao, Y., & Zhao, X. (2014). Effect of NaCl and sugar on physicochemical properties of flaxseed polysaccharide-potato starch complexes. *Science Asia 40*(1): 60-68. http://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2014.40.060.
12. Christianson, D.D., Hodge, J.E., Osborne, D., & Detroy, R.W. (1981). Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum, and cellulose gum. *Cereal Chemistry 58*(6): 513-517.
13. Dengate, H.N. (1984). *Swelling, pasting, and gelling of wheat starch*. in: Advances in Cereal Science and Technology, (Ed.) Y. Pomeranz, Vol. VI, American Association of Cereal Chemists, INC. St. Paul, Minnesota, pp. 49-82.
14. Dos Santos, T.P.R., Franco, C.M.L., do Carmo, E.L., Jane, J.L., & Leonel, M. (2019). Effect of spray-drying and extrusion on physicochemical characteristics of sweet potato starch. *Journal of Food Science and Technology 56*(1): 376-383. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3498-y.

15. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Homepage of FAO. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC, 2020(last update: 22 December 2020)
16. Funami, T., Kataoka, Y., Omoto, T., Goto, Y., Asai, I., & Nishinari, K. (2005). Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch. *Food Hydrocolloids 19*(1): 1-13. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.04.024.
17. Funami, T., Nakauma, M., Noda, S., Ishihara, S., Asai, I., Inouchi, N., & Nishinari, K. (2008). Effects of some anionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behaviors of wheat starch: Soybean-soluble polysaccharide and gum arabic. *Food Hydrocolloids 22*(8): 1528-1540. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.10.008.
18. Gunaratne, A., Ranaweera, S., & Corke, H. (2007). Thermal, pasting, and gelling properties of wheat and potato starches in the presence of sucrose, glucose, glycerol, and hydroxypropyl β-cyclodextrin. *Carbohydrate Polymers 70*(1): 112-122. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.03.011.
19. Karazhiyan, H., Razavi, S.M.A., & Phillips, G.O. (2011a). Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids 25*(5): 915-920. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.022.
20. Karazhiyan, H., Razavi, S.M.A., Phillips, G.O., Fang, Y., Al-Assaf, S., & Nishinari, K. (2011b). Physicochemical aspects of hydrocolloid extract from the seeds of Lepidium sativum. *International Journal of Food Science & Technology 46*(5): 1066-1072. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02583.x.
21. Kaur, L., Singh, J., Singh, H., & McCarthy, O.J. (2008). Starch–cassia gum interactions: A microstructure–Rheology study. *Food Chemistry 111*(1): 1-10. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.027.
22. Kontogiorgos, V. (2015). Galactomannans (Guar, Locust Bean, Fenugreek, Tara). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21589-8.
23. Kumar, R., & Khatkar, B.S. (2017). Thermal, pasting and morphological properties of starch granules of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Journal of Food Science and Technology 54*(8): 2403-2410. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2681-x.
24. Lee, M.H., Baek, M.H., Cha, D.S., Park, H.J., & Lim, S.T. (2002). Freeze–thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. *Food Hydrocolloids 16*(4): 345-352. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00107-2.
25. Lo, C., & Ramsden, L. (2000). Effects of xanthan and galactomannan on the freeze/thaw properties of starch gels. *Food/Nahrung 44*(3): 211-214. https://doi.org/10.1002/1521-3803(20000501)44:3<211::AID-FOOD211>3.0.CO;2-O.
26. Lutfi, Z., Nawab, A., Alam, F., Hasnain, A., & Haider, S.Z. (2017). Influence of xanthan, guar, CMC and gum acacia on functional properties of water chestnut (*Trapa bispinosa*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules* 103: 220-225. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.046.
27. Mandala, I.G., & Bayas, E. (2004). Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions. *Food Hydrocolloids 18*(2): 191-201. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(03)00064-X.
28. Maningat, C.C., Seib, P.A., Bassi, S.D., Woo, K.S., & Lasater, G.D. (2009). *Wheat Starch*. in: Starch (Third Edition), (Eds.) J. BeMiller, R. Whistler, Academic Press. San Diego.
29. Mason, W.R. (2009). *Starch Use in Foods*. in: Starch (Third Edition), (Eds.) J. BeMiller, R. Whistler, Academic Press. San Diego, pp. 745-795.
30. Matia-Merino, L., Prieto, M., Roman, L., & Gómez, M. (2019). The impact of basil seed gum on native and pregelatinized corn flour and starch gel properties. *Food Hydrocolloids* 89: 122-130. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.005.
31. Mirnezhad Anbarani, N., Razavi, S.M.A., & Taghizadeh, M. (2021). Impact of sage seed gum and whey protein concentrate on the functional properties and retrogradation behavior of native wheat starch gel. *Food Hydrocolloids* 111. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106261.
32. Murphy, P. (2000). *Starch*. in: Handbook of Hydrocolloids, (Eds.) G.O. Phillips, P.A. Williams, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.
33. Naji-Tabasi, S., & Mohebbi, M. (2015). Evaluation of cress seed gum and xanthan gum effect on macrostructure properties of gluten-free bread by image processing. *Journal of Food Measurement and Characterization 9*(1): 110-119. https://doi.org/10.1007/s11694-014-9216-1.
34. Naji, S., & Razavi, S.M.A. (2014). Functional and textural characteristics of cress seed (*Lepidium sativum*) gum and xanthan gum: Effect of refrigeration condition. *Food Bioscience* 5: 1-8. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2013.10.003.
35. Naji, S., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2012). Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium sativum*) and xanthan gums: A comparative study. *Food Hydrocolloids 28*(1): 75-81. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.11.012.

36. Naji, S., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2013). Effect of freezing on functional and textural attributes of Cress Seed Gum and Xanthan Gum. *Food and Bioprocess Technology 6*(5): 1302–1311. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0811-z.
37. Sahraiyan, B., Naghipour, F., Karimi, M., & Davoodi, M.G. (2013). Evaluation of *Lepidium sativum* seed and guar gum to improve dough rheology and quality parameters in composite rice–wheat bread. *Food Hydrocolloids 30*(2): 698-703. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.013.
38. Shevkani, K., Singh, N., Bajaj, R., & Kaur, A. (2017). Wheat starch production, structure, functionality and applications—a review. *International Journal of Food Science & Technology 52*(1): 38-58. https://doi.org/10.1111/ijfs.13266.
39. Sun, Q., Wu, M., Bu, X., & Xiong, L. (2015). Effect of the amount and particle size of wheat fiber on the physicochemical properties and gel morphology of starches. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128665.
40. Techawipharat, J., Suphantharika, M., & BeMiller, J.N. (2008). Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches. *Carbohydrate Polymers 73*(3): 417-426. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.12.019.
41. Tester, R., & Sommerville, M. (2003). The effects of non-starch polysaccharides on the extent of gelatinisation, swelling and α-amylase hydrolysis of maize and wheat starches. *Food Hydrocolloids 17*(1): 41-54. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00032-2.
42. Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 14*(5): 568-585. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143.
43. Xing, Q., Hou, C., Zhang, Z., Han, K., Yan, Q., & Luo, J. (2017). Comparative study on the physicochemical properties of pea, chickpea, and wheat starch gels in the presence of sweeteners. *Starch - Stärke 69*(9-10): 1600287-n/a. https://doi.org/10.1002/star.201600287.
44. Xiong, J., Li, Q., Shi, Z., & Ye, J. (2017). Interactions between wheat starch and cellulose derivatives in short-term retrogradation: Rheology and FTIR study. *Food Research International* 100: 858-863. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.061.
45. Zhang, H., Sun, B., Zhang, S., Zhu, Y., & Tian, Y. (2015). Inhibition of wheat starch retrogradation by tea derivatives. *Carbohydrate Polymers* 134: 413-417. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.018.
46. Zhang, X., Li, R., Kang, H., Luo, D., Fan, J., Zhu, W., Liu, X., & Tong, Q. (2017). Effects of low molecular sugars on the retrogradation of tapioca starch gels during storage. *PloS One 12*(12): e0190180. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190180.
47. Zhou, Y., Wang, D., Zhang, L., Du, X., & Zhou, X. (2008). Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. *Food Hydrocolloids 22*(4): 505-512. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.01.010.